Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 3, Fall 2022, p. 409-421

Optimization of Biogas Production Efficiency from Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste under Thermal Pretreatment at Different Concentrations

S. M. Kamali[1], R. Abdi[2*], A. Rohani[3], Sh. Abdollahpour[4], S. Ebrahimi[5]

1- Ph.D. in Agricultural Mechanization Engineering, University of Tabriz, Iran
2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Iran
3- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Mashhad, Iran
4- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Tabriz, Iran
5- Professor, Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Iran
(*- Corresponding Author Email: r.abdi@tabrizu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.2021.68771.1018

Received: 22-02-2021 Revised: 18-10-2021 Accepted: 26-10-2021 Available Online: 26-10-2021	**How to cite this article:** Kamali, S. M., R. Abdi, A. Rohani, Sh. Abdollahpour, and S. Ebrahimi. 2022. Optimization of Biogas Production Efficiency from Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste under Thermal Pretreatment at Different Concentrations. Journal of Agricultural Machinery 12 (3): 409-421. (In Persian). DOI: 10.22067/jam.2021.68771.1018

Introduction

Since anaerobic digestion leads to the recovery of energy and nutrients from waste, it is considered the most sustainable method for treating the organic fraction of municipal solid wastes.

However, due to the long solid retention time in the anaerobic digestion process, the low performance of the process in biogas production as well as the uncertainty related to the safety of digested materials for utilizing in agriculture, applying different pretreatments is recommended.

Thermal pretreatment is one of the most common pretreatment methods and has been used successfully on an industrial scale. Very little research, nevertheless, has been done on the effects of different temperatures and durations of thermal pretreatment on the enhancement of anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes (OFMSW).

The main effect of thermal pretreatment is the rapturing cell membrane and dissolving organic components. Thermal pretreatment at temperatures above 170 °C may result in the formation of chemical bonds that lead to particle agglomeration and can cause the loss of volatile organic components and thus reduce the potential for methane production from highly biodegradable organic waste. Therefore, since thermal pretreatment at temperatures above 100 °C and high pressure requires more energy and more sophisticated equipment, thermal pretreatment of organic materials at low temperatures has recently attracted more attention. According to the researchers, thermal pretreatment at temperatures below 100 °C did not lead to the decomposition of complex molecules but the destruction of large molecule clots.

The main purpose of this study was to find the optimal levels of pretreatment temperature and time and the most appropriate concentration of digestible materials to achieve maximum biogas production using a combination of the Box Behnken Response Surface Method to find the objective function followed by optimizing these variables by Genetic Algorithm.

Materials and Methods

In this study, the synthetic organic fraction of municipal solid waste was prepared similar to the organic waste composition of Karaj compost plant. The digestate from the anaerobic digester available in the Material and Energy Research Institute was used as an inoculum for the digestion process. Some characteristics of the raw materials that are effective in anaerobic digestion including the moisture content, total solids, volatile solids of organic waste, and the inoculum were measured. Experimental digesters were set up according to the model used by MC Leod. After size reduction and homogenization, the synthetic organic wastes were subjected to thermal pretreatment (70, 90, 110 °C) at specific times (30, 90, 150 min).

The Response Surface methodology has been used in the design of experiments and process optimization. In this study, three operational parameters including pretreatment temperature, pretreatment time, and concentration of organic material (8, 12, and 16%) were analyzed. After extracting the model for biogas efficiency based on the relevant variables, the levels of these variables that maximize biogas production were determined using a Genetic Algorithm.

Results and Discussion

The Reduced Quadratic model, was used to predict the amount of biogas production. The value of the correlation coefficient between the two sets of real and predicted data was more than 0.95. The results suggested that pretreatment time followed by the pretreatment temperature had the greatest contribution (50.86% and 44.81%, respectively) to biogas production. Changes in the organic matter concentration, on the other hand, did not have a significant effect ($p < 0.01$) on digestion enhancement (1.63%) but were statistically significant at $p < 0.10$.

The response surface diagram showed that the increase in pretreatment time first led to a rise and then a fall in biogas production. The decline in biogas production seemed set to continue with pretreatment time. Meanwhile, the increase in pretreatment temperature from 70 $^{\circ}$C to 110 $^{\circ}$C first contributed to higher biogas production and then the decrease in gas production occurred.

The reason for this fall was probably the browning and Maillard reaction.

The regression model was applied as the objective function for variables optimization using the Genetic Algorithm method. Based on the results of this algorithm, the optimal thermal pretreatment for biogas production was determined at 95 $^{\circ}$C for 104 minutes and at the concentration of 12%. The expected amount of biogas production by applying the optimal pretreatment conditions was 445 mL-g^{-1} VS.

Conclusion

In this study, the variables including thermal treatment temperature and time as well as the concentration of organic waste to be anaerobically digested were optimized to achieve the highest biogas production from anaerobic digestion.

Statistical analysis of the results revealed that the application of thermal pretreatment increased biogas production considerably. According to the regression model, the contribution of pretreatment time and temperature to biogas production was significant (50.86% and 44.81% respectively). In stark contrast, varying substrate concentrations in the range of 8 to 16% had a smaller effect (1.63%) on biogas production. The results of this study also showed that the best pretreatment temperature and time were 95 $^{\circ}$C and 104 minutes, respectively, at a concentration of 12% by generating 445 mL-g^{-1} VS biogas which is 31.17% higher than the biogas yield from anaerobic digestion of untreated organic wastes at this concentration.

Keywords: Anaerobic digestion, Genetic algorithm, Optimization, Thermal pretreatment

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۴۲۱-۴۰۹

بهینه‌سازی تولید زیست‌گاز در هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی جامد شهری با غلظت‌های مختلف تحت پیش‌تیمارهای حرارتی

سید مسعود کمالی[1]، رضا عبدی[2*]، عباس روحانی[3]، شمس‌الله عبدالله‌پور[4]، سیروس ابراهیمی[5]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۴

چکیده

در چند دهه اخیر منابع تجدیدپذیر انرژی که باعث آلودگی کمتر محیط‌زیست شوند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان استحصال زیست‌گاز از ضایعات آلی جامد شهری برای تولید انرژی به دلیل کنترل گازهای گلخانه‌ای و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه هضم بی‌هوازی به‌عنوان یکی از بهترین روش های مواجهه با پسماندهای آلی جامد شهری مطرح است، با این حال، این فرآیند دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد. از این‌رو پیش‌فرآوری‌های مختلفی به‌منظور بهبود فرآیند هضم بی‌هوازی و افزایش تولید زیست‌گاز از هضم پسماندهای آلی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پیش‌فرآوری حرارتی از موثرترین روش‌ها جهت حذف عوامل بیماری‌زای موجود در مواد زائد آلی است. در همین حال این پیش‌فرآوری می‌تواند تاثیر به‌سزایی در بهبود هضم بی‌هوازی و تسریع هیدرولیز مواد داشته باشد. بنابراین یافتن شرایط بهینه این پیش‌تیمار برای دستیابی به بالاترین مقدار تولید زیست‌گاز حائز اهمیت به‌سزایی است. هدف از این تحقیق دستیابی به بهترین دما و زمان و غلظت در هضم مواد آلی موجود در پسماند شهری است. در این مطالعه، دما و مدت اعمال پیش‌تیمار حرارتی به‌ترتیب در سه سطح ۷۰، ۹۰ و ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و ۳۰، ۹۰ و ۱۵۰ دقیقه و غلظت نیز در سطوح ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد مورد بررسی قرار گرفتند. به این منظور ۱۵ آزمایش به روش سطح پاسخ باکس‌بنکن طراحی شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که اثر متغیرهای دما و زمان در سطح ۱ درصد بر تولید زیست‌گاز معنی‌دار هستند در حالی‌که تغییرات غلظت در محدوده مورد مطالعه اثر کمتری در تولید این گاز داشته است. همچنین، بهترین سطوح متغیرهای دما و زمان پیش‌تیمار و غلظت مواد هضم‌شونده برای تولید زیست‌گاز به‌ترتیب ۹۵ درجه سانتی‌گراد، ۱۰۴ دقیقه و غلظت ۱۲ درصد بوده که پیش‌بینی می‌شود اعمال پیش‌تیمار حرارتی در شرایط بهینه متغیرهای مورد ارزیابی موجب تولید ۴۴۵ میلی‌لیتر زیست‌گاز به ازای هر گرم ماده آلی جامد فرار موجود در پسماندهای آلی شود که بدین ترتیب با اعمال پیش‌تیمار حرارتی در شرایط بهینه، افزایش ۳۱/۱۷ درصدی تولید زیست‌گاز نسبت به میزان زیست‌گاز ناشی از هضم مواد بدون اعمال پیش‌تیمار (۳۳۹/۳۳±۶/۱۸ میلی‌لیتر) قابل انتظار خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، پیش‌تیمار حرارتی، هضم بی‌هوازی

مقدمه

هضم بی‌هوازی یک فرآیند زیستی است که در آن متابولیسم طبیعی میکروبی در شرایط عدم حضور اکسیژن، تثبیت پسماندهای آلی را در پی دارد. از آنجا که هضم بی‌هوازی منجر به بازیابی انرژی و مواد مغذی از پسماند می‌گردد از آن به‌عنوان یکی از پایدارترین روش‌های مواجهه با بخش آلی پسماندهای جامد شهری به لحاظ زیست‌محیطی یاد می‌شود. همچنین هضم بی‌هوازی بخش آلی پسماندهای جامد شهری موجب کاهش فضای مورد نیاز جهت دفن پسماندها، کاهش تولید شیرابه و انتشار متان از مراکز دفن پسماند خواهد شد (Maghanaki *et al.*, 2013). کاربرد پیش‌تیمارهای مختلف به دلایل کند بودن فرآیند هضم، عملکرد پایین فرآیند در تولید زیست‌گاز و عدم اطمینان از بی‌خطر بودن مواد هضم‌شده جهت استفاده در کشاورزی توصیه می‌گردد.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، برای تبدیل فناوری هضم بی‌هوازی به یک روش اقتصادی و کاربردی با راندمان انرژی بالاتر، می‌توان کاهش حجم مورد نیاز راکتور از طریق افزایش میزان جامدات فرار در واحد حجم راکتور (Pavan *et al.*, 2000) و انجام

۱- دانش‌آموخته دکترای مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
۴- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، ایران
۵- استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: r.abdi@tabrizu.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.2021.68771.1018

پیش‌فرآوری‌های مختلف جهت بهبود هیدرولیز (Bougrier *et al.*, 2008; Carrere *et al.*, 2010) را به‌عنوان دو راهکار اساسی مورد توجه قرار داد.

ویژگی‌های رئولوژیکی محیط هضم کاملا وابسته به غلظت مواد یا تمرکز مواد جامد می‌باشد. برخی از محققین سه محدوده هضم تر (محتوای مواد جامد کمتر از ۱۰ درصد)، هضم نیمه‌خشک (محتوای مواد جامد بین ۱۰ تا ۱۵ درصد) و هضم خشک (محتوای مواد جامد بیش از ۱۵ درصد) را در این رابطه معرفی نموده‌اند (Li *et al.*, 2011; Aboudi *et al.*, 2017). شایان ذکر است فرآیند هضم خشک نسبت به هضم تر با فرض اندازه یکسان، قادر به تیمار مقدار بیشتری پسماند است (Fernandez *et al.*, 2008). از سوی دیگر با توجه به این‌که مربوط ساختن محدوده‌های فوق به نیازمندی‌های فرآیند هضم برای یک ماده مشخص دشوار است بنابراین انجام آزمایش‌ها برای یافتن غلظت بهینه آن ماده جهت هضم الزامی است. به‌عنوان مثال، محققینی گزارش نمودند که هضم بی‌هوازی مواد لیگنوسلولوزی در شرایط محتوای مواد جامد بالا می‌توانند به دلیل تجمع مواد بازدارنده مانند اسیدهای چرب، محدودیت دسترسی میکروارگانیسم‌ها به مواد و محتوای کم آب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها اثرات نامطلوبی بر عملکرد فرآیند داشته باشد (Ge *et al.*, 2016). بنابراین در این تحقیق سعی گردید محتوای مواد جامد هضم‌شونده هر سه محدوده هضم تر (۸٪)، نیمه‌خشک (۱۲٪) و خشک (۱۶٪) را شامل گردد.

پیش‌تیمار حرارتی یکی از متداول‌ترین روش‌های پیش‌فرآوری بوده و به‌صورت موفقیت‌آمیزی در مقیاس صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است (Carlsson *et al.*, 2012). پیش‌فرآوری حرارتی همچنین منجر به حذف عوامل بیماری‌زا، بهبود عملکرد آبگیری و کاهش گرانروی مواد هضم‌شونده و تسهیل مدیریت این مواد می‌گردد (Edelmann *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2012). اثر اصلی پیش‌فرآوری حرارتی، گسیختگی غشاء سلولی و حل کردن اجزای آلی است (Ferrer *et al.*, 2008; Bien *et al.*, 2004; Marin *et al.*, 2010). محلولیت تقاضای اکسیژن شیمیایی[1] و دما رابطه‌ای مستقیم دارند. همچنین در دماهای پایین‌تر و زمان‌های بالاتر با اعمال پیش‌فرآوری حرارتی می‌توان به محلولیت بیشتری دست یافت (Mottet *et al.*, 2009). از سوی دیگر پیش‌فرآوری حرارتی در دماهای بالاتر از ۱۷۰°C ممکن است منجر به ایجاد پیوندهای شیمیایی گردد که توده شدن ذرات را به دنبال داشته باشد (Bougrier *et al.*, 2006). یکی از معروف‌ترین پدیده‌ها، واکنش مایلارد[2] است که بین کربوهیدرات‌ها و اسیدهای آمینه رخ می‌دهد و مواد پیچیده‌ای که به سختی قابل تجزیه زیستی هستند تولید می‌کند. این واکنش در نتیجه دماهای بالا (بیش از ۱۵۰°C) و یا حتی در دماهای پایین‌تر (‎<۱۰۰°C) و زمان‌های طولانی‌تر پیش‌فرآوری اتفاق می‌افتد. علاوه بر این واکنش‌های شیمیایی، پیش‌فرآوری حرارتی در دماهای بالا می‌تواند موجب اتلاف مواد آلی فرار و در نتیجه کاهش پتانسیل تولید زیست‌گاز از مواد با قابلیت بالای تجزیه‌پذیری زیستی گردد. بنابراین اثرات این پیش‌فرآوری بستگی به نوع مواد و محدوده دمایی مورد استفاده خواهد داشت (Elliot and Mahmood, 2012; Penaud *et al.*, 1999).

پیش‌فرآوری حرارتی لجن حتی در دماهای پایین‌تر (۷۰°C) اثر قابل‌توجهی بر حذف عوامل بیماری‌زا دارد (Skiadas *et al.*, 2005). احتمالا بر پایه چنین نتایجی، قانون EC 1772/2002 اروپا، پیش‌فرآوری پسماندهای جامد آلی را برای حداقل یک ساعت با دمای ۷۰°C الزامی دانسته است. در این رابطه، پیش‌فرآوری حرارتی در دمای ۷۰°C به‌صورت متعددی مورد مطالعه قرار گرفت. برای مثال، پیش‌فرآوری پسماندهای خانگی و زیست‌توده جلبکی در ۷۰°C به مدت ۱ و ۸ ساعت بررسی شده و مشخص شد که این پیش‌فرآوری تاثیری در افزایش تولید زیست‌گاز نداشت (Chamchoi *et al.*, 2011).

پیش‌فرآوری حرارتی در دمای ۷۰°C بر تولید گاز از هضم ترموفیلیک و مزوفیلیک لجن اولیه و ثانویه اثرات متفاوتی داشته است. در حالی‌که این پیش‌فرآوری دارای اثر مطلوبی بر هضم مزوفیلیک لجن اولیه بوده، اما برای بهبود هضم ترموفیلیک مفید نبوده است. با این حال اعمال این پیش‌فرآوری، تولید گاز ناشی از هضم لجن ثانویه در شرایط مزوفیلیک و ترموفیلیک را افزایش داد. علت این امر وجود مقادیر بیشتر کربوهیدرات در لجن اولیه و مقدار پروتئین و لیپید بالاتر در لجن ثانویه است (Raposo *et al.*, 2012).

از آنجایی‌که پیش‌فرآوری حرارتی در دمای بیش از ۱۰۰°C و فشار بالا انرژی بیشتر و تجهیزات پیچیده‌تری می‌طلبد، اخیرا پیش‌فرآوری حرارتی مواد آلی در دمای پایین توجه بیشتری را به خود جلب کرده است (Climent *et al.*, 2007). طبق گزارش محققین، پیش‌فرآوری حرارتی در دماهای کمتر از ۱۰۰°C منجر به تجزیه مولکول‌های پیچیده نشد اما لخته‌های مولکول‌های درشت را تخریب کرد (Prorot *et al.*, 2011). محققان دیگری نیز با اعمال دمای ۹۰°C به نتیجه مشابهی رسیدند (Barjenbruch *et al.*, 2003). نتایج آن‌ها نشان داد که در این دما الیاف گیاهی از هم گسیخته نمی‌شوند اما تحت تاثیر این پیش‌فرآوری قرار می‌گیرند. در تحقیقی گزارش شد که پیش‌فرآوری حرارتی حلالیت پروتئین‌ها و افزایش حذف ذرات کربوهیدراتی را در پی داشت (Neyens and Baeyens, 2003).

1- Chemical Oxygen Demand (COD)
2- Maillard Reaction

اثرات پیش‌تیمار حرارتی عمدتا در خصوص بهبود هضم پساب و لجن فاضلاب و بیشتر در دماهای بالا و تعداد محدود تیمارها و با تحلیل‌های ساده آماری و مقایسات میانگین مورد بررسی قرار گرفته است (Bougrier *et al*., 2006; Ariunbaatar *et al*., 2014; Li *et al*., 2016) در حالی‌که در این پژوهش ضمن مدل‌سازی تولید زیست‌گاز از پسماندهای آلی شهری تحت پیش‌تیمار حرارتی در دماهای متوسط که بر اساس نتایج مطالعات پیشین انتخاب شدند و غلظت‌های مختلف (هضم تر، نیمه‌خشک و خشک)، مطالعات آماری در خصوص میزان تاثیر این متغیرها بر میزان زیست‌گاز تولیدی ناشی از اعمال این پیش‌فرآوری بر هضم پسماندهای آلی نیز انجام گرفته است. از الگوریتم ژنتیک به دلیل سادگی و توانایی حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده غیرخطی (Panda and Padhy, 2008)، برای دستیابی به بهترین سطوح متغیرهای مورد مطالعه بهره گرفته شد.

هدف اصلی این تحقیق یافتن سطوح بهینه متغیرهای دما و زمان پیش‌تیمار حرارتی و مناسب‌ترین غلظت مواد هضم‌شونده به‌منظور دستیابی به بیشینه تولید زیست‌گاز با استفاده از تلفیق روش سطح پاسخ باکس بنکن برای یافتن تابع هدف و بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک بوده است.

مواد و روش‌ها

مواد آلی و آماده‌سازی جهت هضم

با توجه به تغییرات ترکیب پسماند، ترکیب ثابتی از مواد آلی به‌منظور یکنواختی مواد آزمایشی ساخته شد. جدول ۱ ترکیب مواد مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

اندازه مواد آلی توسط یک خردکن تا کمتر از ۲ میلی‌متر کاهش داده و این مواد کاملا با هم مخلوط شدند و تا زمان استفاده به‌عنوان مواد هضم‌شونده (حداکثر دو روز) در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند (Li *et al*., 2011).

جدول ۱– ترکیب پسماند مورد استفاده در آزمایش‌ها

Table1- Components of the synthetic organic waste in the essay

ردیف No	نوع پسماند آلی Organic waste material	درصد Percentage
1	ضایعات سیب‌زمینی، پوست موز و پسماندهای سبزیجات و کاهو Potato waste, banana peel, vegetable and lettuce leftover	40
2	ضایعات گوجه، پیاز، خیار، هویج، بادنجان، فلفل دلمه‌ای، کدو تنبل و کلم Tomato, Onion, Cucumber, Carrot, Eggplant, Bell pepper, Zucchini and Cabbage	40
3	ضایعات نان و شیرینی، فراورده‌های گوشتی و لبنی، برنج پخته، کاغذ و دستمال‌کاغذی و سایر مواد شامل چای، پوسته تخم‌مرغ، آجیل و خرما و روغن Tissue paper, and miscellaneous Bread and bakery, meat product, dairy product, steamed rice, paper and materials including tea, eggshell, walnut, date, and oil	20

مواد تلقیحی

در این تحقیق، مواد خروجی از هاضم بی‌هوازی موجود در پژوهشگاه مواد و انرژی به‌عنوان مایه تلقیح فرآیند هضم مورد استفاده قرار گرفت. در این هاضم عملیات هضم در دمای محیط و بدون گرمایش مواد هضم‌شونده صورت گرفته و مواد ورودی آن عمدتا کود دامی و همچنین پسماندهای غذایی بوده است.

جدول ۲– مشخصات کلی مواد آلی و ماده تلقیحی مورد استفاده

Table 2- Characteristics of the synthetic OFMSW and the inoculum

ماده Material	محتوای مواد جامد TS (wt %)	محتوای مواد جامدفرار VS (wt %)	اسیدچرب فرار VFA (mg L^{-1})	اسیدیته pH
مواد آلی پسماند (OFMSW)	18.85±0.17	91.88±0.85	4219.85±149.73	5.63±0.04
ماده تلقیحی (Inoculum)	16.89±0.42	62.28±0.57	621.43±57.24	8.67±0.06

پس از جداسازی قطعات درشت‌تر از ۲ میلی‌متر موجود در این لجن، جهت افزایش غلظت آن به ۱۶ درصد، دستگاه سانتریفوژ به‌کار گرفته شده و این ماده تا زمان استفاده در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در شرایط بی‌هوازی نگهداری شد (Angelidaki *et al*., 2009). این عملیات تا زمانی که تولید روزانه گاز از مواد تلقیحی به میزان ناچیز و کمتر از یک درصد میزان گاز تجمعی شد (حداکثر ۷ روز) ادامه یافت. جدول ۲ ویژگی‌های مواد آلی و ماده تلقیحی مورد استفاده در این تحقیق پیش از تنظیم محتوای رطوبت را نشان می‌دهد.

آماده‌سازی مواد مورد استفاده برای هضم و اندازه‌گیری‌های لازم

برخی ویژگی‌های مواد اولیه که در هضم بی‌هوازی موثر است شامل میزان درصد رطوبت و مواد جامد کل و درصد مواد جامد فرار اندازه‌گیری شدند.

اندازه‌گیری درصد رطوبت مواد اولیه برای تنظیم غلظت مواد هضم‌شونده اهمیت دارد. پس از تعیین درصد رطوبت مواد، با اضافه نمودن آب، درصد محتوای مواد جامد در سه غلظت ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد تنظیم شد. میزان مواد جامد کل و جامدات فرار به‌ترتیب از طریق توزین مواد پس از کسر رطوبت و سوزاندن در دماهای بالا حاصل گردید (APHA[1], 2012). یک نمونه از مواد که به‌خوبی مخلوط شده در یک ظرف با وزن خشک مشخص ریخته و در دمای ۱۰۳ تا ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا زمانی که به وزن ثابتی برسد حرارت داده شد. ظرف حاوی مواد در دسیکاتور تا دمای محیط خنک شده و توزین شد. میزان جامدات کل از رابطه (۱) محاسبه شد (APHA, 2012).

$$TS = \frac{(A - B) \times 1000}{V} \qquad (۱)$$

که در آن TS[2] میزان جامدات کل یا غلظت ماده ($mg\text{-}L^{-1}$)، A وزن نهایی مواد خشک شده و ظرف در ۱۰۵–۱۰۳ درجه سانتی‌گراد (mg)، B وزن ظرف (mg) و V حجم نمونه برداشت شده (mL) جهت آنالیز می‌باشند.

برای محاسبه مواد جامد فرار، ظرف حاوی مواد جامد خشک شده در ۱۰۵–۱۰۳ درجه در کوره با دمای ۵۰±۵۵۰ درجه قرار داده شده تا به وزن ثابتی برسد. میزان کاهش وزن نهایی نسبت به وزن ظرف و مواد خشک، نشانگر میزان مواد جامد فرار می‌باشد و از رابطه (۲) محاسبه گردید (American Public Health Association, 2012).

$$VS = \frac{(A - C) \times 1000}{V} \qquad (۲)$$

VS[3] میزان جامدات فرار ($mg\text{-}L^{-1}$)، A وزن نهایی مواد خشک شده در ۱۰۵–۱۰۳ درجه سانتی‌گراد و ظرف (mg)، C وزن نهایی مواد بعد از سوختن در دمای ۵۰±۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و ظرف (mg) و V حجم نمونه برداشت شده (mL) جهت آنالیز می‌باشند.

پیش‌تیمار حرارتی

با توجه به ماهیت بخش آلی موجود در پسماندهای شهری که عمدتا شامل موادی مانند باقی‌مانده غذا و سبزیجات و میوه‌جات بوده و برخلاف مواد لیگنوسلولوزی و لجن فعال، به لحاظ بیولوژیکی به راحتی تجزیه‌پذیر می‌باشند، اعمال دماهای بالا در این‌گونه مواد موجب کاهش مواد فرار و همچنین واکنش مایلارد (واکنش بین اسیدهای آمینه و قندها) خواهد گشت که این امر موجب کاهش بازده تولید متان خواهد شد. برای مثال محققین نشان دادند که افزایش تولید متان با دمای پیش‌فرآوری رابطه مستقیم نداشته و متان تجمعی مواد پیش‌تیمارشده در ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد در مدت زمان‌های پیش‌فرآوری ۷۵ و ۱۲۰ دقیقه کمتر از متان تولیدشده در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت مشابه بوده است. این موضوع احتمالا مربوط به روی دادن واکنش مایلارد می‌باشد که محصول این واکنش، ملانویدین‌ها[4] بوده که به سختی در شرایط بی‌هوازی تجزیه می‌شوند (Li *et al*., 2016). لذا باتوجه به تحقیقات پیشین، دماها و زمان‌های مختلف مطابق جدول ۳ برای اعمال پیش‌تیمار حرارتی پسماندهای آلی بررسی شدند.

پسماندهای آلی، پس از کاهش اندازه و همگن‌سازی، در زمان‌های مشخص تحت پیش‌تیمار حرارتی قرار گرفتند. برای انجام پیش‌تیمار حرارتی تعدادی بطری شیشه‌ای یک لیتری مخصوص اتوکلاو GL ۴۵ حاوی ۲۰۰ گرم از مواد آلی خرد شده و یک آون مورد استفاده قرار گرفت. درب بطری‌ها به‌منظور جلوگیری از تبخیر و خروج بخار آب محکم بسته شده و پس از اعمال حرارت برای مدت مشخص، بطری‌ها از آون خارج شده و تا دمای محیط خنک شدند. مواد پس از اعمال پیش‌تیمار و اختلاط با مواد تلقیحی درون هاضم‌های آزمایشگاهی برای مدت چهار هفته در دمای مزوفیلیک در انکوباتور نگهداری شده و میزان تولید زیست‌گاز هر یک از آن‌ها اندازه‌گیری گشت.

1- American Public Health Association
2- Total Solids
3- Volatile Solids
4- Melanoidins

جدول ۳- سطوح تیماری مورد ارزیابی در این پژوهش

Table3- Levels of examined treatment in this study

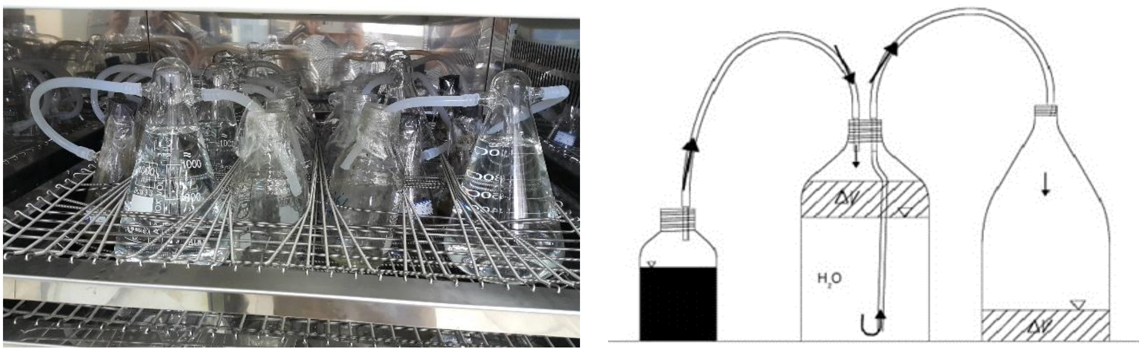
دمای پیش‌تیمار **Pretreatment temperature (℃)**	زمان پیش‌تیمار **Pretreatment time (min)**	غلظت نمونه‌ها (٪) **(TS%)**
70, 90,110	30، 90، 150	8، 12، 16

راه‌اندازی هاضم‌ها و اندازه‌گیری میزان زیست‌گاز

هاضم‌های آزمایشی در این تحقیق مطابق مدل مورد استفاده مک لئود (MC Leod *et al.*, 2015) که همان روش جابه‌جایی آب برای اندازه‌گیری زیست‌گاز تولیدی است، راه‌اندازی شدند. مجموعه هاضم جهت اندازه‌گیری زیست‌گاز تولیدی شامل سه قسمت، بطری مواد هضم‌شونده، بطری آب و بطری خالی برای جمع‌آوری آب بر اساس میزان زیست‌گاز تولیدی بوده است. میزان گاز تولیدی به‌صورت روزانه با توجه به میزان مایع جابه‌جا شده از ظرف آب به ظرف خالی اندازه‌گیری و مجموع این مقادیر روزانه جابه‌جا شده آب که متناسب با حجم گاز تولیدی در طول زمان هضم بوده به‌عنوان میزان تجمعی زیست‌گاز هر هاضم گزارش شد.

در شروع یک فرآیند هضم بایستی میزان مشخصی مایه تلقیحی جهت تامین میکروارگانیسم‌های مورد نیاز به مواد هضم‌شونده افزوده گردد. نسبت مواد آلی به مایه تلقیح به صورت مقدار جامدات فرار مواد هضم‌شونده به مواد جامد فرار ماده تلقیحی بیان می‌گردد (Liu *et al.*, 2009). برخی محققان نسبت مناسب میزان جامدات فرار مواد آلی به مایه تلقیحی جهت تولید زیست‌گاز را ۱ به ۲ توصیه کرده‌اند (Li *et al.*, 2011; Mirmasoumi *et al.*, 2018). در این مطالعه نیز پس از تنظیم محتوای مواد جامد ماده هضم‌شونده و لجن تلقیحی در سه غلظت ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد که به‌ترتیب بیانگر سه نوع هضم تر، نیمه‌خشک و خشک هستند، مواد هضم‌شونده و لجن با نسبت ۱ به ۲ ($grVS_{Substrate}/grVS_{Inocula}$) بر اساس مواد جامد فرار ترکیب و کاملا یکنواخت شدند. فضای بالای شیشه‌های هاضم به‌منظور اطمینان از ایجاد شرایط بی‌هوازی، به‌وسیله گاز نیتروژن برای مدت ۲ دقیقه اکسیژن‌زدایی شد.

به این ترتیب هضم بی‌هوازی تیمارهای متعدد از مواد پیش‌فرآوری شده در سه غلظت مختلف در انکوباتور تحت شرایط مزوفیلیک در دمای ۱±۳۷°C در مدت چهار هفته انجام گرفت. در این تحقیق ضمن اختلاط مناسب اولیه مواد هضم‌شونده و لجن تلقیح، هاضم‌ها یک مرتبه در هر روز به مدت ۳۰ ثانیه تکان داده می‌شدند.



شکل ۱- نحوه قرارگیری بطری‌ها جهت اندازه‌گیری زیست‌گاز تولیدی

Fig.1. Biogas measurement setup

طراحی آزمایش

از روش سطح پاسخ در بهینه‌سازی و ارزیابی اثرات متقابل فاکتورهای مستقل فرآیندهای هضم بی‌هوازی استفاده شد. در این پژوهش سه پارامتر عملیاتی شامل دمای پیش‌تیمار، زمان پیش‌تیمار و غلظت مواد هضم‌شونده در شرایط هضم مزوفیلیک آزمایش شدند. بر اساس تحقیقات قبلی، در این پژوهش دماها و زمان‌های به‌کار رفته متناسب با شرایط پسماندهای آلی غذایی تعیین شد. سطوح متغیرهای مستقل و کدهای مربوطه در جدول ۴ برای انجام آزمایش با طرح باکس بنکن برای تخمین مدل رگرسیونی آورده شده است. برای بهینه‌سازی سطوح متغیرها جهت دستیابی به بیشترین مقدار تولید زیست‌گاز از الگوریتم ژنتیک استفاده شد.

جدول ٤- سطوح متغیرهای مستقل و کدهای مربوطه

Table4- Levels of independent variables and related codes

متغیرهای مستقل	نشانه Indication		سطوح کدگذاری شده و مقادیر واقعی آن‌ها Coded levels and their related values		
	کدگذاری شده Coded	بدون کدگذاری Uncoded	-1	0	1
دما Temperature (℃)	X1	Z1	70	90	110
زمان Time (min)	X2	Z2	30	90	150
غلظت Concentration (%)	X3	Z3	8	12	16

مدل ریاضی تولید زیست‌گاز به عنوان متغیر وابسته در این طرح به‌صورت رابطه (۳) است:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i<j}}^{k-1} \sum_{j=2}^{k} \beta_{ji} X_i X_j \quad (۳)$$

نتایج و بحث

مدل‌سازی تولید زیست‌گاز

زیست‌گاز تولیدی ناشی از هضم بی‌هوازی پسماندهای آلی که در غلظت‌های مختلف تحت پیش‌تیمارهای مختلف حرارتی قرار گرفته بودند تا زمانی که میزان تولید گاز در سه روز متوالی ناچیز و قابل اغماض (کمتر از ۱ درصد میزان تجمعی تولید گاز) بود، اندازه‌گیری و به‌عنوان زیست‌گاز تجمعی برای تحلیل آزمایش‌ها با طرح باکس‌بنکن در نظر گرفته شدند.

انتخاب مدل

مدل‌های مختلف شامل مدل خطی، عامل‌های متقابل، درجه دو و درجه دو کاهش یافته در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ٥- مدل‌های مختلف توجیه تغییرات پاسخ

Table 5- Different models of response variations justification

مدل Model	میزان خطا RMSE	درصد خطا MAPE	ضریب تبیین R^2
Linear	23.1	4.57	0.37
2FI	22.9	4.56	0.37
Red Quad	4.75	0.97	0.97
Quad	4.57	0.97	0.97

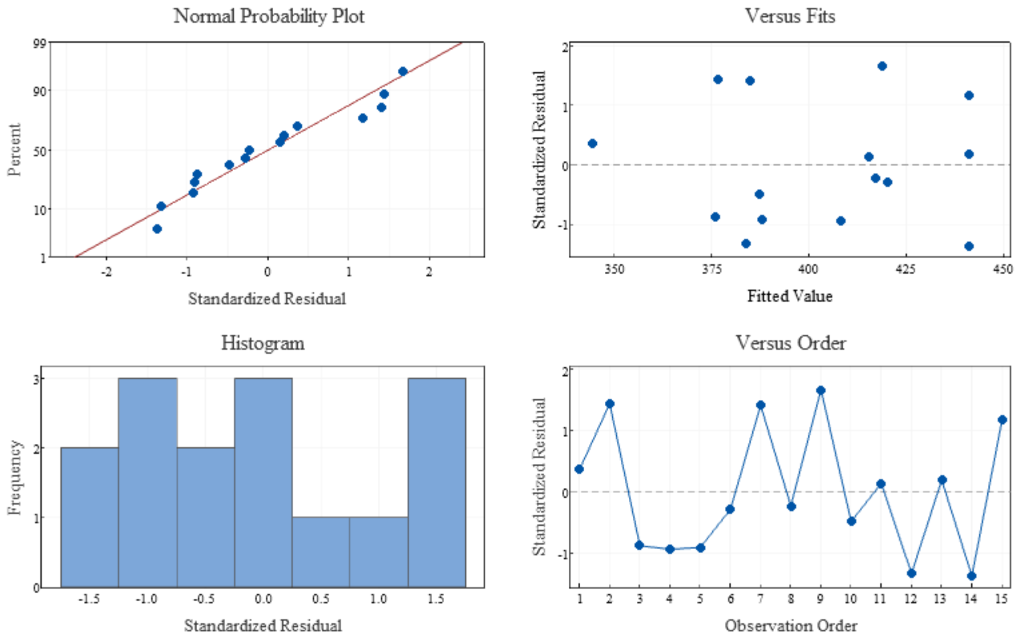
بر اساس نتایج حاصل شده، عملکرد مدل درجه دوم و درجه دوم کاهش یافته اختلاف ناچیزی با هم داشته و بنابراین برای سادگی کار از مدل درجه دوم کاهش یافته مطابق رابطه (۴) که دارای جملات کمتری بود برای پیش‌بینی میزان تولید زیست‌گاز استفاده شد. این مدل با حداکثر خطای ۰/۹۷٪ به‌عنوان بهترین مدل به‌منظور توجیه تغییرات میزان تولید زیست‌گاز تحت پیش‌تیمار حرارتی در زمان‌ها، دماها و غلظت‌های مختلف برای پیش‌بینی استفاده شد.

$$Y = -428.30 + 15.09X_1 + 1.91X_2 + 9.72X_3 - 0.08X_1^2 - 0.01X_2^2 - 0.42X_3^2 \quad (۴)$$

که در آن X_1 و X_2 به‌ترتیب دمای پیش‌تیمار و زمان پیش‌تیمار حرارتی و X_3 نشانگر محتوای مواد جامد یا غلظت مواد است.

تجزیه واریانس مدل رگرسیون و اعتبارسنجی

نتایج ارزیابی اعتبار مدل درجه دوم کاهش‌یافته در شکل ۲ قابل مشاهده است. سه فرض نرمال بودن توزیع خطاها، یکسان بودن واریانس‌ها و عدم خود همبستگی خطاها، می‌توانند اعتبار مدل را تایید کنند. مطابق شکل (a,c) ۲ واضح است که پراکنش خطاها حول خط نرمال قرار دارد که موید نرمال بودن توزیع خطاها است. همچنین شکل (b)۲ نشان می‌دهد که روند مشخصی بین مقادیر برازش شده با خطاها وجود ندارد و در نتیجه واریانس تیمارها با یکدیگر اختلاف ناچیزی دارند. علاوه بر این، شکل (d)۲ نیز نشان می‌دهد که توزیع خطاها در مقابل ترکیب آزمایش از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند که این دلالت بر عدم وجود خودهمبستگی بین خطاهای مدل رگرسیونی است لذا نتایج تخمین‌های مدل قابل اعتماد خواهند بود.



شکل ۲– نتایج ارزیابی اعتبار مدل رگرسیون چندگانه برای تولید زیست‌گاز

Fig.2. The results of multiple regression model evaluation for biogas production

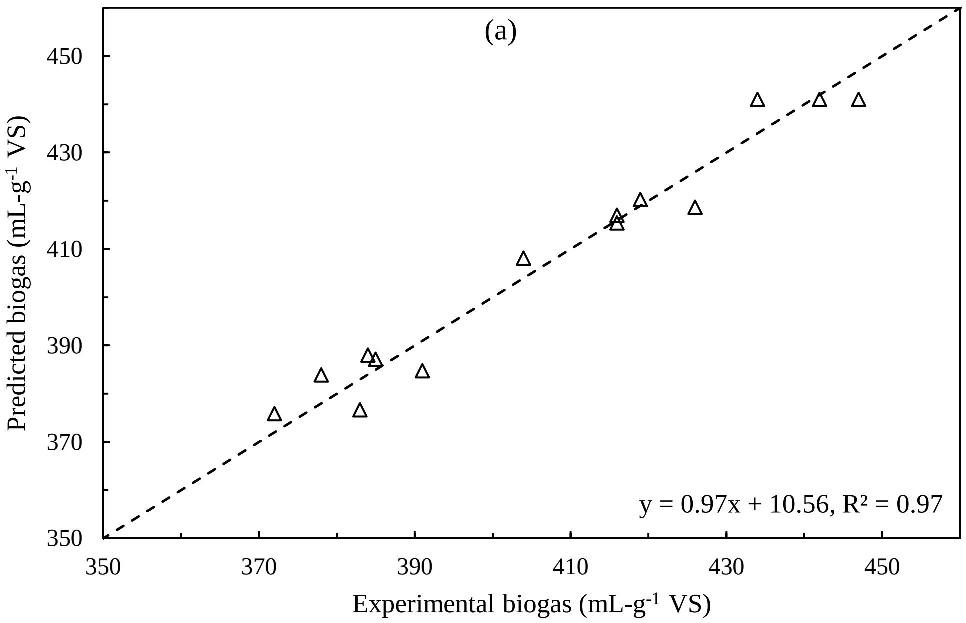
جدول ۶ نتایج تحلیل واریانس مدل‌های درجه دوم کاهش یافته در تولید زیست‌گاز را نمایش می‌دهد. همانطور که نتایج مقادیر P-Value نشان می‌دهد دما و زمان پیش‌تیمار به‌عنوان دو پارامتر تاثیرگذار دارای اثرات معنی‌داری در سطح ۱٪ در تغییرات تولید زیست‌گاز هستند. از سوی دیگر گرچه اثر غلظت در سطح ۱٪ معنی‌دار نشد اما در سطح ۱۰٪ اثر معنی‌داری بر تولید زیست‌گاز داشت. علاوه بر این، مدل رگرسیونی توانسته ۹۷٪ تغییرات تولید زیست‌گاز را توسط عامل‌های مدل تبیین نماید.

جدول ٦– نتیجه تجزیه واریانس مدل درجه دوم کاهش یافته MLR تولید زیست‌گاز

Table 6- Analysis of variance (ANOVA) for reduced quadratic model of biogas production

منابع تغییرات **Source of variations**	درجه آزادی **DF**	مجموع مربعات **SS**	میانگین مربعات **MS**	**F-Value**	**P-Value**
Regression رگرسیون	6	11293.00	1882.16	48.14	0.00
T(°C) دما	1	4130.5	4130.47	105.66	0.00
t(min) زمان	1	5138.60	5138.56	131.44	0.00
C(%) غلظت	1	153.00	153.04	3.91	0.08
T^2	1	3722.10	3722.08	95.21	0.00
t^2	1	4020.90	4020.92	102.85	0.00
C^2	1	168.20	168.23	4.30	0.07
Residueباقیمانده	8	312.70	39.09		
Lack of fitعدم برازش	6	226.70	37.79	0.88	0.62
Pure errorخطای خالص	2	86.00	43.00		
Totalکل	14				
$R^2 = 97\%$ $R^2_{adj} = 95\%$					

همانطور که در شکل۳ دیده می‌شود، مقدار همبستگی بین دو مجموعه داده واقعی و پیش‌بینی شده بیش از ۰/۹۷ است. بر این اساس توافق بین مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل با مقادیر حاصل از آزمایش‌ها تایید می‌شود.



شکل ۳- ارزیابی توافق مقادیر زیست‌گاز

Fig.3. Accordance assessment of biogas values

سهم تاثیر پارامترهای تولید زیست‌گاز

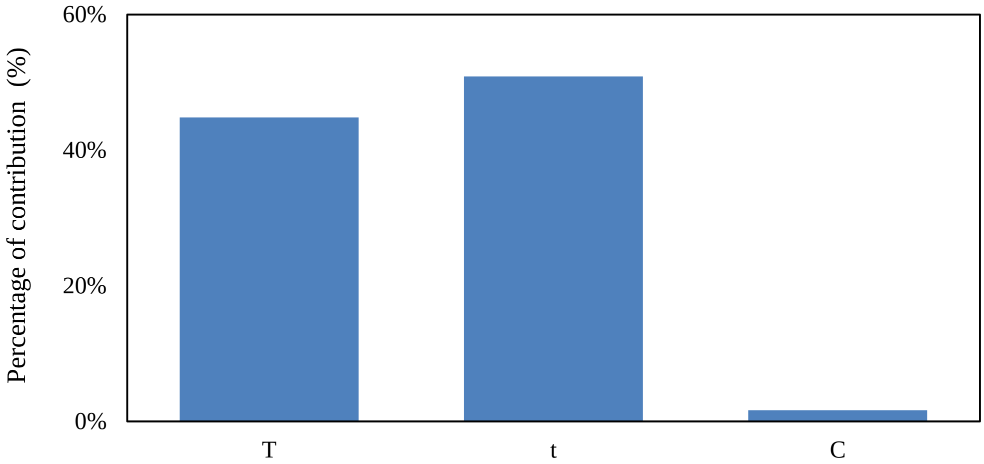
سهم تاثیر هر یک از متغیرهای مستقل شامل دمای پیش‌فرآوری، مدت زمان اعمال پیش‌فرآوری حرارتی و غلظت مواد هضم‌شونده بر فرآیند هضم بی‌هوازی و تولید زیست‌گاز در شکل ۴ آورده شده است. سهم تاثیر متغیرها از تقسیم مجموع مربعات هر عامل بر مجموع مربعات کل محاسبه شد. بیشترین تاثیر در تولید زیست‌گاز به‌ترتیب مربوط به زمان پیش‌تیمار (۵۰/۸۶ درصد) و دمای پیش‌تیمار (۴۴/۸۱ درصد) است در حالی‌که تغییرات غلظت تاثیر بسیار کمتری در تولید داشته است (۱/۶۳ درصد). با این حال اثر غلظت در تولید زیست‌گاز معنی‌دار شده که با برخی از نتایج تحقیقات پیشین مطابق است. به‌عنوان مثال محققینی گزارش کرده‌اند که هنگامی که محتوای جامد مواد هضم‌شونده از ۲۰ به ۳۰ درصد افزایش یافت، تولید متان به میزان ۱۷٪ کم شد (Fernandez *et al.*, 2008). از سوی دیگر اثر کمتر غلظت در این تحقیق احتمالا به دلایل نزدیک بودن مقادیر غلظت‌های بررسی شده و همچنین مخلوط کردن کامل مواد در ابتدای هضم و بالا بودن نسبت مواد تلقیحی در ترکیب با مواد هضم‌شونده بوده است که باعث جلوگیری از اسیدی شدن ترکیب در اثر تولید اسیدهای چرب و ممانعت از اختلال در فرآیند هضم در غلظت‌های بالاتر شد.

نمودار سطح پاسخ

شکل ۵ نمودار سه‌بعدی سطح پاسخ تولید زیست‌گاز را در غلظت ۱۲ درصد تحت تاثیر دماها و زمان‌های مورد بررسی نشان می‌دهد.

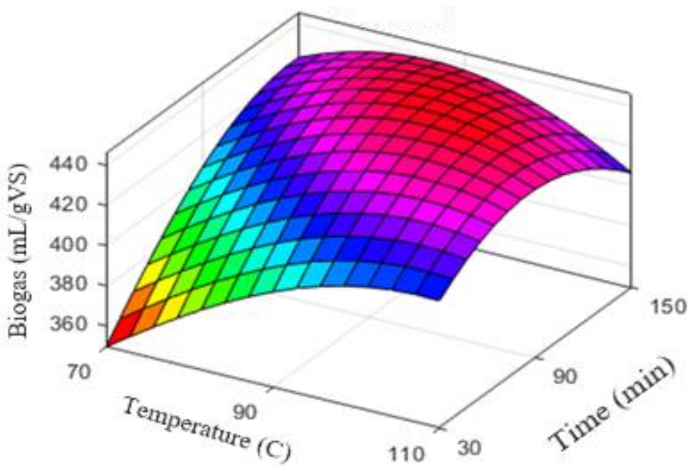
همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش زمان پیش‌تیمار در محدوده زمانی مورد بررسی، تولید زیست‌گاز ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. از سوی دیگر با افزایش دما از ۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد ابتدا افزایش تولید زیست‌گاز و سپس کاهش تولید اتفاق افتاده است. دلیل کاهش تولید زیست‌گاز احتمالا واکنش قهوه‌ای شدن و مایلارد بوده است. این واکنش باعث تولید مواد با ترکیبات پیچیده شده که به راحتی قابل تجزیه نیستند (Elliot and Mahmood, 2012).

در یک آزمایش، افزایش اندکی در تولید زیست‌گاز از هضم لجن پیش‌فرآوری شده در دمای ۷۰°C برای یک ساعت گزارش شد در حالی‌که این افزایش تولید زیست‌گاز با اعمال دمای ۹۰°C به مدت یک ساعت، تا ۲۰ برابر مشاهده شد (Appels *et al.*, 2010). در آزمایش دیگری اعمال دمای ۷۰°C موجب دستیابی به افزایش ۷۸ درصدی تولید زیست‌گاز با محتوای ۶۰٪ متان شد. از سوی دیگر پیش‌فرآوری فضولات دامی در دماهای بالاتر از ۱۱۰°C باعث سخت و قهوه‌ای تیره شدن مواد در این دماها شده که این موضوع به روی دادن واکنش‌های مایلارد نسبت داده شد (Rafique *et al.*, 2010). محققین دیگری نیز کاهش میزان تولید متان از هضم بی‌هوازی مواد آلی که تحت پیش‌تیمار حرارتی در دمای ۱۱۰ درجه قرار گرفتند نسبت به میزان تولید متان ناشی از هضم مواد آلی که با دماهای پایین‌تر تحت پیش‌تیمار قرار گرفتند را به دلیل واکنش مایلارد گزارش کرده‌اند (Li *et al.*, 2016) که منطبق با نتایج این مطالعه است.



شکل ٤- سهم تاثیر دمای پیش‌تیمار (T)، زمان پیش‌تیمار (t) و غلظت (C) در تولید زیست‌گاز

Fig.4. Contribution of pretreatment temperature(T), time(t) and digestate concentration(C) to biogas production



شکل ٥- نمودار سطح پاسخ تولید زیست‌گاز بر حسب تغییرات دما و زمان پیش‌تیمار در غلظت۱۲٪

Fig.5. Response Surface diagram for biogas production based on pretreatment temperature and time at a concentration of 12%

بهینه‌سازی فرآیند تولید زیست‌گاز

از مدل رگرسیونی به‌عنوان تابع هدف جهت بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک استفاده شد. بر اساس نتایج الگوریتم ژنتیک، دما و زمان بهینه پیش‌تیمار حرارتی و غلظت مناسب برای تولید بیشینه زیست‌گاز به‌ترتیب ۹۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰۴ دقیقه و ۱۲ درصد ارزیابی شد. میزان مورد انتظار تولید زیست‌گاز با اعمال شرایط بهینه دما و زمان پیش‌تیمار و غلظت بهینه برابر ۴۴۵ میلی‌لیتر زیست‌گاز به‌ازای هر گرم ماده آلی فرار خواهد بود. با توجه به این‌که میزان تولید گاز در شرایط واقعی هضم بدون انجام پیش‌تیمار در غلظت ۱۲ درصد ۶/۱۸±۳۳۹/۳۳ میلی‌لیتر به‌ازای گرم ماده آلی فرار بوده است، پیش‌بینی می‌شود اعمال پیش‌تیمار در شرایط بهینه موجب افزایش ۳۱/۱۷ درصدی تولید گاز گردد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌منظور دستیابی به بیشترین تولید زیست‌گاز از هضم بی‌هوازی، متغیرهای دما و زمان پیش‌تیمار حرارتی و غلظت پسماندهای آلی بهینه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که اعمال پیش‌تیمار حرارتی در افزایش تولید زیست‌گاز موثر بود به‌طوری‌که با توجه به مدل رگرسیونی، تاثیر زمان و دمای پیش‌تیمار در تولید زیست‌گاز در محدوده بررسی شده قابل‌توجه و به‌ترتیب ۵۰/۸۶ و

۴۴/۸۱ درصد بوده است. برخلاف این دو متغیر، غلظت مواد هضم‌شونده در محدوده ۸ تا ۱۶ درصد تاثیر کمتری (۱/۶۳ درصد) در تولید زیست‌گاز داشته است به‌طوری که اثر عامل غلظت در سطح ۱٪ معنی‌دار نشد اما در سطح ۱۰٪ معنی‌دار شد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که بهترین دما و زمان پیش‌تیمار به‌ترتیب ۹۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۰۴ دقیقه و در غلظت ۱۲ درصد بوده است که با اعمال پیش‌تیمار حرارتی در شرایط بهینه، تولید میزان ۴۴۵ میلی‌لیتر زیست‌گاز به‌ازای هر گرم ماده جامد فرار موجود در مواد هضم‌شونده قابل پیش‌بینی است.

References

1. Aboudi, K., C. J. Alvarez-Gallego, and L. I. Romero-García. 2017. Influence of total solids concentration on the anaerobic co-digestion of sugar beet by-products and livestock manures. Science of the Total Environment 586: 438-445. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.178.
2. American Public Health Association (APHA). 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22. Washington DC (USA): American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.
3. Angelidaki, I., M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, J. L. Campos, A. J. Guwy, and J. B. Van Lier. 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. Water Science and Technology 59 (5): 927-934. DOI: 10.2166/wst.2009.040.
4. Appels, L., J. Degreve, B. Van der Bruggen, J. Van Impe, and R. Dewil. 2010. Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, heavy metal release and anaerobic digestion. Bioresource Technology 101 (15): 5743-5748. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.068.
5. Ariunbaatar, J., A. Panico, G. Esposito, F. Pirozzi, and P. N. Lens. 2014. Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. Applied Energy 123: 143-156. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.035.
6. Barjenbruch, M., and O. Kopplow. 2003. Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge. Advances in Environmental Research 7 (3): 715-720. https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00032-1.
7. Bien, J. B., G. Malina, J. D. Bien, and L. Wolny. 2004. Enhancing anaerobic fermentation of sewage sludge for increasing biogas generation. Journal of Environmental Science and Health Part A 39 (4): 939-949. DOI: 10.1081/ese-120028404.
8. Bougrier, C., C. Albasi, J. P. Delgenès, and H. Carrere. 2006. Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 45 (8): 711-718. https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.02.005.
9. Bougrier, C., J. P. Delgenes, and H. Carrere. 2008. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion. Chemical Engineering Journal 139 (2): 236-244. https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.07.099.
10. Carlsson, M., A. Lagerkvist, and F. Morgan-Sagastume. 2012. The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. Waste Management 32 (9): 1634-1650. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.016.
11. Carrere, H., C. Dumas, A. Battimelli, D. J. Batstone, J. P. Delgenes, J. P. Steyer, and I. Ferrer. 2010. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. Journal of Hazardous Materials 183 (1-3): 1-15. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.129.
12. Chamchoi, N., H. Garcia, and I. Angelidaki. 2011. Methane potential of household waste; Batch assays determination. Applied Environmental Research 33 (1): 13-26.
13. Climent, M., I. Ferrer, M. del Mar Baeza, A. Artola, F. Vazquez, and X. Font. 2007. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. Chemical Engineering Journal 133 (1-3): 335-342. https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.02.020.
14. Edelmann, W., U. Baier, and H. Engeli, 2005. Environmental aspects of the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid wastes and of solid agricultural wastes. Water Science and Technology 52 (1-2): 203-208.
15. Elliot, A., and T. Mahmood. 2012. Comparison of mechanical pretreatment methods for the enhancement of anaerobic digestion of pulp and paper waste. Water Science Technology 84: 497-505. DOI: 10.2175/106143012x13347678384602.
16. Fernandez, J., M. Perez, and L. I. Romero. 2008. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). Bioresource Technology 99 (14): 6075-6080. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.12.048.
17. Ferrer, I., S. Ponsa, F. Vazquez, and X. Font. 2008. Increasing biogas production by thermal (70℃) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. Biochemical Engineering Journal 42 (2): 186-192. DOI:

10.1016/j.bej.2008.06.020.
18. Ge, X., F. Xu, and Y. Li. 2016. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives. Bioresource Technology 205: 239-249. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.050.
19. Li, C., P. Champagne, and B. C. Anderson. 2011. Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions. Bioresource Technology 102 (20): 9471-9480. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.103.
20. Li, Y., S. Y. Park, and J. Zhu. 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (1): 821-826. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042.
21. Li, Y., Y. Jin, J. Li, H. Li, and Z. Yu. 2016. Effects of thermal pretreatment on the biomethane yield and hydrolysis rate of kitchen waste. Applied Energy 172: 47-58. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.080.
22. Liu, G., R. Zhang, H. M. El-Mashad, and R. Dong. 2009. Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. Bioresource Technology 100 (21): 5103-5108. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.081.
23. Liu, X., W. Wang, X. Gao, Y. Zhou, and R. Shen. 2012. Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste. Waste Management 32 (2): 249-255. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.027.
24. Maghanaki, M. M., B. Ghobadian, G. Najafi, and R. J. Galogah. 2013. Potential of biogas production in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews 28: 702-714. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.021.
25. Marin, J., K. J. Kennedy, and C. Eskicioglu. 2010. Effect of microwave irradiation on anaerobic degradability of model kitchen waste. Waste Management 30 (10): 1772-1779. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.033.
26. McLeod, J. D., M. Z. Othman, D. J. Beale, and D. Joshi. 2015. The use of laboratory scale reactors to predict sensitivity to changes in operating conditions for full-scale anaerobic digestion treating municipal sewage sludge. Bioresource Technology 189: 384-390. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.049.
27. Mirmasoumi, S., R. K. Saray, and S. Ebrahimi. 2018. Evaluation of thermal pretreatment and digestion temperature rise in a biogas fueled combined cooling, heat, and power system using exergo-economic analysis. Energy Conversion and Management 163: 219-238. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.069.
28. Mottet, A., J. P. Steyer, S. Deleris, F. Vedrenne, J. Chauzy, and H. Carrere. 2009. Kinetics of thermophilic batch anaerobic digestion of thermal hydrolysed waste activated sludge. Biochemical Engineering Journal 46 (2): 169-175. https://doi.org/10.1016/j.bej.2009.05.003.
29. Neyens, E., and J. Baeyens. 2003. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. Journal of Hazardous Materials 98 (1-3): 51-67. https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00320-5.
30. Panda, S., and N. P. Padhy. 2008. Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for FACTS_based controller design. Applied Soft Computing 8 (4): 1418-1427. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.10.009.
31. Pavan, P., P. Battistoni, J. Mata-Alvarez, and F. Cecchi. 2000. Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability. Water Science and Technology 41 (3): 75-81.
32. Penaud, V., J. P. Delgenes, and R. Moletta. 1999. Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: Influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability. Enzyme and Microbial Technology 25 (3-5): 258-263. https://doi.org/10.1016/S0141-0229(99)00037-X.
33. Prorot, A., L. Julien, D. Christophe, and L. Patrick. 2011. Sludge disintegration during heat treatment at low temperature: A better understanding of involved mechanisms with a multiparametric approach. Biochemical Engineering Journal 54 (3): 178-184. https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.02.016.
34. Rafique, R., T. G. Poulsen, A. S. Nizami, J. D. Murphy, and G. Kiely. 2010. Effect of thermal, chemical and thermo-chemical pre-treatments to enhance methane production. Energy 35 (12): 4556-4561. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.011.
35. Raposo, F., M. A. De la Rubia, V. Fernandez-Cegri, and R. Borja. 2012. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (1): 861-877. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008.
36. Skiadas, I. V., H. N. Gavala, J. Lu, and B. K. Ahring. 2005. Thermal pre-treatment of primary and secondary sludge at 70℃ prior to anaerobic digestion. Water Science and Technology 52 (1-2): 161-166.